

УДК 621.91:536.2

Ю.Г. Кравченко, канд. техн. наук, Дніпропетровськ, Україна

## **ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ СТРУЖКИ ВІД ТЕРТЯ З ЛЕЗОМ**

*Виведені формули розподілу температури в поздовжньому перерізі стружки та її середнього значення на ділині контакта з лезом. Для умов наявності швидко рухомих джерел теплоти установлені постійність контактної температури тертя і зниження глибини теплонасищення стружки з ростом теплофізичного критерія Пекле.*

*Выведены формулы распределения температуры в продольном сечении стружки и её среднего значения на длине контакта с лезвием. Для условий наличия быстро движущихся источников теплоты установлены постоянство контактной температуры трения и снижение глубины теплонасыщения стружки с ростом теплофизического критерия Пекле.*

*Formulae for the temperature distribution in the longitudinal section of chip and its average value over the length of contact with the blade have been deduced. Constancy of contact temperature of friction and reduction of depth of heat saturation of chips with growth of thermophysical Peclet number have been determined for the conditions of the presence of fast-moving heat sources.*

### *Вступ*

В системі заготовка-лезо-стружка (ЗЛС) найбільшу інформацію про пластичну деформацію і відвід теплоти при різанні несе механо-термічний стан стружки. Безпосередньо температурне поле стружки (ТПС) крім вливу на зношування леза є ключовим фактором для визначення:

- рівня зниження контактної температури тертя на передній поверхні за рахунок теплообміну між стружкою, лезом і заготовкою /1/;
- ступеня прогріву і знеміцнення стружки при аналітичному розрахунку сили різання.

По проблемі розрахунку ТПС найбільш всебічні дослідження були виконані А.Н. Резніковим /2, 3/ застосуванням суми відбитих (фіктивних) рухомих джерел для нетеплопровідних межових площин пластини /4, 5/. Функція розподілу температури по довжині і товщині стружки отримана спеціальними методами інтегрування (без виводу) з представленням в подальшому для контактної площадки /1/ у графічному вигляді.

Другий напрямок розрахунку П.І. Бобрика /6/ базується на виразах /5, 7/ для рухомих джерел теплоти з використанням функції Бесселя. Рішення також отримане чисельними методами інтегрування безрозмірних спеціальних функцій і, на думку самого автора, має найбільшу точність без будь-яких додаткових спрощень.

Обидві методики залишаються надто складними по структурі функції

розподілу температури і трудомісткими, особливо /6/, для інженерного застосування.

*Мета роботи:* удосконалити вивід розрахункової формули температурного поля стружки і дослідити умови адекватності функцій розподілу для пластини і напівобмеженого тіла.

*Постановка задачі*

Схема розташування джерел теплоти тертя на прилезовій стороні стружки зображена на рис. 1.

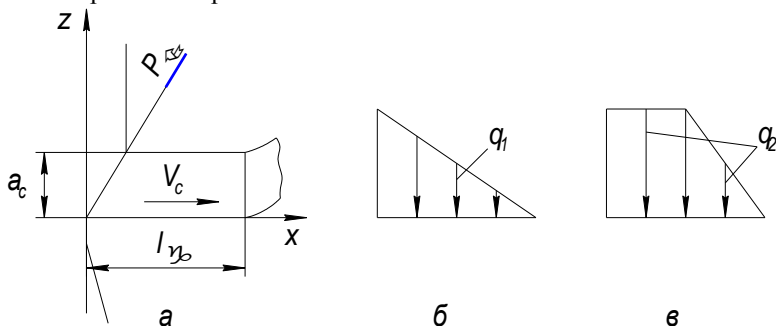


Рисунок 1 – Розрахункова модель ТПС: **a** – система ЗЛС ( $l_y$  і  $a_c$  – довжина контакту з лезом і товщина стружки,  $V_c$  – швидкість сходу стружки); б і в – лінійний  $q_1$  і комбінований  $q_2$  розподіл густини теплоти тертя на контактній довжині

Рішення виконувались шляхом послідовних інтегральних переходів від лінійного миттєвого до смугового швидкорухомого джерела (ШРД) теплоти.

Вихідними положеннями були прийняті:

– вираз температурного поля в двовірних координатах ( $-\infty < y < \infty$ ) від лінійного миттєвого джерела теплоти  $Q_{\text{лм}}$  (Дж/м) на поверхні напівобмеженого тіла (НОТ) /4, 5/

$$\theta_{\text{лм}} = \frac{Q_{\text{лм}}}{2\pi\lambda\tau} \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2 + z^2}{4\omega\tau}\right], \quad (1)$$

де  $\lambda$  і  $\omega$  – коефіцієнти тепло- і температуропровідності;  $\tau$  – час спостереження температури після імпульсу теплоти;  $x_1$ ,  $z_1 = 0$  і  $x$ ,  $z$  – координати джерела і розглядаємої точки.

– модель ТПС на основі системи відбитих джерел теплоти відносно НОТ з аплікатами джерел /4, 5/  $\pm z_1 + 2na$  і розглядаємої точки при  $z_1 = 0$  /3, 5/

$$z_n = z - 2na \quad (2)$$

( $a$  – товщина пластини,  $-\infty < n < \infty$  – ряд цілих чисел).

Температура стружки від роботи деформації в площині зсуву  $P_\phi$  ураховується окремо в системі теплообміну ЗЛС. Відбір теплоти від пари тертя ЛС за рахунок конвективного теплообміну не відбувається.

### *Основна частина*

Розрахунок ТПС складається із чотирьох блоків.

1. Температурне поле лінійного ШРД. Спочатку інтегруванням виразу

$$(1) \text{ по змінній } x_1 \left( \frac{x - x_1}{4\omega\tau} = u, \quad dx_1 = -\sqrt{4\omega\tau} \cdot du, \quad \int_{-\infty}^{\infty} e^{-u} du = \sqrt{\pi} \right)$$

визначаємо розподіл температури по глибині НОТ від плоского миттєвого джерела енергії  $Q_{\text{пм}}$  (Дж/м<sup>2</sup>)

$$Q_{\text{пм}} = \frac{Q_{\text{пм}}\sqrt{\omega}}{\lambda\sqrt{\pi\tau}} \exp\left[-\frac{z^2}{4\omega\tau}\right]. \quad (3)$$

Далі умовно виділяємо на площині  $xy$  смужку шириною  $dx$  і замінюємо джерело  $Q_{\text{пм}}$  на смугове  $Q_{\text{см}}$ . Вираз для лінійного ШРД з швидкістю  $V$  і потужністю  $q_{\text{лш}}$  (Вт/м) отримуємо на основі співвідношень переходу  $Q_{\text{см}} = q_{\text{лш}}/V$  і  $\tau = (x - x_1)/V$  із рівняння балансу теплоти  $Q_{\text{см}} \cdot dx = q_{\text{лш}} \cdot d\tau$  (Дж/м) /3, 5/

$$\theta_{\text{лш}} = \frac{q_{\text{лш}}\sqrt{\omega}}{\lambda\sqrt{\pi V(x - x_1)}} \exp\left[-\frac{V \cdot z^2}{4\omega(x - x_1)}\right]. \quad (4)$$

2. Температурне поле пластини (стружки). Перехід від НОТ до пластини з адіабичними площинами виконується з застосуванням методу відбитих джерел. Накладання друг на друга температурних полів безкінечної кількості відбитих лінійних джерел (4) з аплікатою  $z_n$  (2) призводить до

пошукового виразу (джерело  $q_{лш}$  при  $z_1 = 0$  рухається по нижній прилезовій стороні стружки)

$$\Delta\theta_{лш} = \frac{q_{лш}\sqrt{\omega}}{\lambda\sqrt{\pi V_c(x-x_1)}} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \exp\left[-\frac{V_c(z-2na_c)^2}{4\omega(x-x_1)}\right]. \quad (5)$$

Практично [3] буває достатньо обмежитися рядом  $n = 0, \pm 1$ , рідко  $\pm 2$ .

Повну температуру в точці  $x, z$  стружки від смугового ШРД густиною  $q_{сш}$  (Вт/м<sup>2</sup>) з функцією розподілу напружень  $f(\psi_1)$  на довжині  $l_y$  дає інтегрування (5) відносно  $\psi_1$

$$\theta_{сш} = \frac{q_{сш}\sqrt{\omega \cdot l_y}}{\lambda\sqrt{\pi V_c}} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \int_0^{\psi} \frac{f(\psi_1)}{\sqrt{\psi-\psi_1}} \exp\left[-\frac{p}{\psi-\psi_1}\right] d\psi_1 \quad (6)$$

$$\text{з } p = j \cdot i, \quad j = \frac{V_c \cdot a_c^2}{4\omega \cdot l_y}, \quad i = (\varepsilon - 2n)^2, \quad (7)$$

де  $\psi = x/l_y$  і  $\varepsilon = z/a_c$  – безрозмірні параметри.

2.1 Варіант розподілу напружень по трикутнику  $f = 1 - \psi_1$  (рис. 1б) при різанні без наросту. Інтеграл в виразі (6) при  $1/(\psi - \psi_1) = s$ ,  $d\psi_1 = s^{-2} \cdot ds$ ,  $1 - \psi_1 = (1 - \psi) + s^{-1}$ ,  $\sqrt{\psi - \psi_1} = s^{-0.5}$  приймає вид

$$\begin{aligned} E_1 &= \int_{\psi-1}^{\infty} [(1-\psi) + s^{-1}] e^{-p \cdot s} \frac{ds}{s^{1.5}}. & \text{Тоді [8,9]:} \\ I_1 &= \int_{\psi-1}^{\infty} e^{-p \cdot s} \frac{ds}{s^{1.5}} = -\frac{2}{\sqrt{s}} e^{-p \cdot s} - 2\sqrt{\pi \cdot p} \cdot \operatorname{erf} \sqrt{p \cdot s} \Bigg|_{\frac{1}{\psi}}^{\infty} = \\ &= 2 \left[ \psi^{0.5} e^{-\frac{p}{\psi}} - \sqrt{\pi \cdot p} \left( 1 - \operatorname{erf} \sqrt{\frac{p}{\psi}} \right) \right]; \\ I_2 &= \int_{\psi-1}^{\infty} e^{-p \cdot s} \frac{ds}{s^{2.5}} = -\frac{1}{1.5 s^{1.5}} e^{-p \cdot s} \Bigg|_{\frac{1}{\psi}}^{\infty} - \frac{p}{1.5} \int_{\frac{1}{\psi}}^{\infty} e^{-p \cdot s} \frac{ds}{s^{1.5}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{2}{3} \psi^{1.5} e^{-\frac{p}{\psi}} - \frac{2}{3} p \cdot I_1. \quad \text{В сумі}$$

$$\begin{aligned} E_1 &= (1 - \psi) I_1 + \frac{2}{3} \psi^{1.5} e^{-\frac{p}{\psi}} - \frac{2}{3} p \cdot I_1 = \\ &= \frac{4}{3} \left[ \left( \frac{3}{2} - p - \psi \right) \psi^{0.5} e^{-\frac{p}{\psi}} - \sqrt{\pi \cdot p} \left( \frac{3}{2} - p - \frac{3}{2} \psi \right) \left( 1 - \operatorname{erf} \sqrt{\frac{p}{\psi}} \right) \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

2.2 Варіант рівномірно-трикутного розподілу напружень  $f = 1$  (*const*) при  $0 < \psi_1 < 0,5$  і  $f = 1 - \psi_1$  при  $0,5 < \psi_1 < 1$  (рис. 1в) для різання з наростом. На підставі заміни комбінованої форми на приведену  $f = 1,5(1 - \psi_1)$  по еквівалентній площі епюри приймаємо /10/

$$E_2 = k_{n\phi} \cdot E_1 \quad \text{з} \quad k_{n\phi} = \frac{k_{\phi}(\text{поз.11})}{k_{\phi}(\text{поз.6})} = \frac{1,2}{0,8} = 1,5. \quad (9)$$

З урахуванням (8) і (9) замість (6) запишемо

$$\left. \begin{aligned} \theta_c &= \frac{q_{yc} \cdot \sqrt{\omega \cdot l_y}}{\lambda \sqrt{\pi \cdot V_c}} \cdot C, \\ C &= \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} E \approx E_{(-n)} + \dots + E_0 + \dots + E_{(+n)} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Тут  $q_{yc} = q_{y\mu} - q_{yl}$ , де  $q_{y\mu}$  – густина тепловиділення на контактi ЛС (первісна через силу, швидкість та площу тертя);  $q_{yc}$  і  $q_{yl}$  – густини теплопоглинання стружкою і лезом (остання визначається послідовно із системи рівнянь контактних температур на передній і задній поверхнях леза /1/)

По виразу (10) досліджується прогрів стружки по перерізу  $l_y \times a_c$  ( $\psi \times \varepsilon$ ).

3. Середня температура стружки по довжині контакта з лезом ( $\psi = 1$ ).

**3.1.** Середня температура на зазначеному рівні  $\varepsilon$  прогріву стружки визначається функцією суми середньо-інтегральних значень складових  $\sum E_c$  (10) виразу (8) по формулі

$$E_c = \frac{4}{3} \int_0^1 \left[ \left( \frac{3}{2} - p \right) \psi^{0.5} e^{-\frac{p}{\psi}} - \psi^{1.5} e^{-\frac{p}{\psi}} + \left( \frac{3}{2} - p \right) \sqrt{\pi p} \cdot \operatorname{erf} \sqrt{\frac{p}{\psi}} - \right. \\ \left. - \frac{3}{2} \sqrt{\pi p} \cdot \psi \cdot \operatorname{erf} \sqrt{\frac{p}{\psi}} + \frac{3}{2} \sqrt{\pi p} \cdot \psi - \left( \frac{3}{2} - p \right) \sqrt{\pi p} \right] d\psi. \quad (11)$$

Кожен інтеграл в (11) обчислюється /8, 9/ окремо.

$$I_1 = \int_0^1 \psi^{0.5} e^{-\frac{p}{\psi}} d\psi = \left| \frac{p}{\psi} = t, d\psi = -p \cdot t^{-2} dt, t_1 = \infty, t_2 = p \right| = \\ = p^{1.5} \int_p^\infty e^{-t} \frac{dt}{t^{2.5}} = p^{1.5} \left[ -\frac{1}{1.5 t^{1.5}} e^{-t} - \frac{1}{1.5} \left( -\frac{1}{0.5 \cdot t^{0.5}} e^{-t} - 2\sqrt{\pi} \operatorname{erf} \sqrt{t} \right) \right]_p^\infty = \\ = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} p^{1.5} - \frac{4}{3} p \cdot e^{-p} + \frac{2}{3} e^{-p} - \frac{4\sqrt{\pi}}{3} p^{1.5} \operatorname{erf} \sqrt{p}. \\ I_2 = \int_0^1 \psi^{1.5} e^{-\frac{p}{\psi}} d\psi = \left| \frac{p}{\psi} = t, \psi^{1.5} = \left( \frac{p}{t} \right)^{1.5} \right| = p^{2.5} \int_p^\infty e^{-t} \frac{dt}{t^{3.5}} = \\ = \frac{2}{5} p^{2.5} \left[ -\frac{1}{t^{2.5}} e^{-t} + \frac{2}{3 t^{1.5}} e^{-t} - \frac{4}{3 t^{0.5}} e^{-t} - \frac{4\sqrt{\pi}}{3} \operatorname{erf} \sqrt{t} \right]_p^\infty = \\ = -\frac{8\sqrt{\pi}}{15} p^{2.5} + \frac{2}{5} e^{-p} - \frac{4}{15} p e^{-p} + \frac{8}{15} p^2 e^{-p} + \frac{8\sqrt{\pi}}{15} p^{2.5} \cdot \operatorname{erf} \sqrt{p}. \\ I_3 = \int_0^1 \operatorname{erf} \sqrt{\frac{p}{\psi}} d\psi = \int_0^1 \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\frac{p}{\psi}}} e^{-t^2} dt \right) d\psi =$$

$$\begin{aligned}
 &= \left| \sqrt{\frac{p}{\psi}} = s, d\psi = -2ps^{-3}ds, s_1 = \infty, s_2 = \sqrt{p} \right| = \frac{4p}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{p}}^{\infty} \left( \int_0^s e^{-t^2} dt \right) \frac{ds}{s^3} = \\
 &= \left| u = \int_0^s e^{-t^2} dt, dv = \frac{ds}{s^3}, du = e^{-s^2} ds, v = -\frac{1}{2s^2} \right| = \\
 &= \frac{2p}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{1}{p} \int_0^{\sqrt{p}} e^{-t^2} dt + \int_{\sqrt{p}}^{\infty} \frac{1}{s^2} e^{-s^2} ds \right). \\
 &I_{31} = \int_0^{\sqrt{p}} e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erf} \sqrt{p} \\
 &I_{32} = \int_{\sqrt{p}}^{\infty} \frac{1}{s^2} e^{-s^2} ds = \left| r = s^2, ds = \frac{dr}{2r^{0.5}}, r_1 = p \right| = \\
 &= \frac{1}{2} \int_p^{\infty} e^{-r} \frac{dr}{r^{1.5}} = p^{-0.5} e^{-p} - \sqrt{\pi} + \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf} \sqrt{p}. \\
 &I_3 = -2p + \frac{2}{\sqrt{\pi}} p^{0.5} e^{-p} + \frac{4}{\pi} \operatorname{erf} \sqrt{p} + 2p \cdot \operatorname{erf} \sqrt{p}. \\
 &I_4 = \int_0^1 \psi \cdot \operatorname{erf} \sqrt{\frac{p}{\psi}} d\psi = \left| \sqrt{\frac{p}{\psi}} = s, \text{ п. } I_3 \right| = \frac{4p^2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{p}}^{\infty} \left( \int_0^s e^{-t^2} dt \right) \frac{ds}{s^5} = \\
 &= \left| u = \int_0^s e^{-t^2} dt, dv = \frac{ds}{s^5}, du = e^{-s^2} ds, v = -\frac{1}{4s^4} \right| =
 \end{aligned}$$

$$= \frac{p^2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{1}{p^2} \int_0^{\sqrt{p}} e^{-t^2} dt + \int_{\sqrt{p}}^{\infty} \frac{1}{s^4} e^{-s^2} ds \right).$$

$$I_{41} = I_{31}.$$

$$I_{42} = \int_{\sqrt{p}}^{\infty} \frac{1}{s^4} e^{-s^2} ds = |r = s^2, \quad \text{п. } I_{32}| =$$

$$= \frac{1}{2} \int_p^{\infty} e^{-r} \frac{dr}{r^{2.5}} = \frac{2\sqrt{\pi}}{3} - \frac{3}{2} p^{-0.5} e^{-p} + \frac{1}{3} p^{-1.5} e^{-p} - \frac{2\sqrt{\pi}}{3} \operatorname{erf} \sqrt{p}.$$

$$I_4 = \frac{2}{3} p^2 + \frac{1}{3\sqrt{\pi}} p^{0.5} e^{-p} - \frac{2}{3\sqrt{\pi}} p^{1.5} e^{-p} + \frac{2}{\pi} \operatorname{erf} \sqrt{p} - \frac{2}{3} p^2 \cdot \exp \sqrt{p}.$$

$$I_5 = \int_0^1 \psi \cdot d\psi = \frac{1}{2}, \quad I_6 = \int_0^1 d\psi = 1.$$

Після групування та спрощення в сумі (11) отримуємо

$$\begin{aligned} E_c = \frac{4}{15} & \left[ \left( 3 + \frac{1}{2} p - p^2 \right) e^{-p} + \sqrt{\pi} \cdot p^{0.5} \left( \left( p^2 - \frac{15}{4} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left( \frac{15}{\pi} - \frac{20 - 5\pi}{\pi} p - p^2 \right) \operatorname{erf} \sqrt{p} \right) \right] = 0.267 [(3 + 0.5p - p^2) e^{-p} + \\ & + 1.77 p^{0.5} ((p^2 - 3.75) + (4.78 - 1.37p - p^2) \operatorname{erf} \sqrt{p})]. \end{aligned} \quad (12)$$

Виразом функції розподілу середньої температури по глибині теплонасищення  $\varepsilon$  (10) з (12) при  $p$  (7) буде

$$C_{\varepsilon c} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} E_c. \quad (13)$$



3.2 Середня температура на контакті тертя, яка становить практичний інтерес, розраховується аналогічно (13) при значенні  $\varepsilon = 0$  ( $i = 4n^2$ ) і відповідному (7) параметрі згідно виразу

$$p_k = \frac{V_c \cdot a_c^2}{4\omega \cdot l_y} 4n^2 \quad (14)$$

$$C_{kc} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} E_{kc}. \quad (15)$$

При цьому вплив товщини стружки на  $C_{kc}$  (15) ураховується множителем  $a_c$  в параметрі  $p_k$  (14).

4. Температурне поле напівобмеженого тіла в якості моделі заміниника пластини. В цьому випадку для визначення функцій розподілу температури по перерізу  $E_T(\psi, \varepsilon)$  (8) і середньої температури по глибині  $E_T(\varepsilon)$  (12) застосовується параметр  $p$  (7) з  $n = 0$

$$p_\tau = \frac{V_c \cdot a_c^2}{4\omega \cdot l_y} \cdot \varepsilon^2. \quad (16)$$

Функція розподілу контактної температури тертя ( $\varepsilon = 0$ ) по  $\psi$  слідує також із  $E_1$  (8) при  $p_\tau = 0$  (16) а її середнє значення (коефіцієнт форми джерела) визначається із  $E_c$  (12)

$$E_{1k} = F_\theta = 2 \cdot \psi^{0.5} \left( 1 - \frac{2}{3} \psi \right), \quad (17)$$

$$E_{kt} = k_\varphi = \frac{4}{15} \cdot 3 = 0.8. \quad (18)$$

Відзначимо, що при  $p_\tau = 0$  (16) формула  $E_{1k}$  (17) і значення  $E_{kt}$  (18) відповідають даним  $F_\theta$  і  $k_\varphi$  поз. 6 /10/.

#### *Реалізація і аналіз*

Дослідженнями функції  $C_{kc}$  (15) встановлена закономірність її зменшення по мірі збільшення параметра  $j$  (7) до значення 0,215, а при подальшому росту  $j$  вона приймає постійну величину  $C_{kc} = 0,8$  (табл. 1)

Таблиця 1 – Вплив параметра  $j$  на значення  $C_{kc}$

$j$ (7)	0,01	0,02	0,05	0,1	0,15	0,2	0,215	$\geq 0,215$
$C_{kc}$ (15)	3,31	2,39	1,53	1,27	1,09	0,87	0,8	0,8

Для доказу коректності розрахунків приводиться приклад обчислення  $C_{kc}$  при  $j = 0,1$ :

n	-2	-1	0	1	2
$p_k$ (14)	1.6	0.4	0	0.4	1.6
$E_{kc}$ (12)	-0.63	0.235	0.8	0.235	-0.63
$C_{kc}$ (15)	$\sum E_{kc} = 2 \cdot 0.235 + 0.8 = 1.27$				

Ряд суми  $C_{kc}$  приймає лише позитивні значення  $E_{kc}$ , тому що від'ємні значення вказують на перевищення ітераційної величини  $a_{cn}$  (через  $p_k$ ) можливої глибини проникнення теплоти.

Якщо параметр  $j$  (7) виразити через критерій Пекле  $P_e = V_c \cdot l_y / \omega$ , то умова  $j = \frac{1}{4} P_e \left( \frac{a_c}{l_y} \right)^2 < 0,215$  виконується при  $P_e < 3,44$  (наприклад, при  $V_c < 0,2$  м/с,  $l_y \approx 2a_c$ ,  $a_c < 0,06 \cdot 10^{-3}$  м,  $\omega > 7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с). При таких обмеженнях (не відповідають суті ШРД теплоти для  $P_e > 8$ ) значення розглядаємої функції підлягають розрахунку по виразу  $C_{kc}$  (15). При наявності ШРД теплоти реальних умов різання доцільно приймати значення  $E_{kt} = k_\phi = 0,8$  (18) пристосовно моделі НОТ.

Також виявлена характерна особливість функції  $E_c$  (12): має нульове значення  $E_c = 0$  при  $p_t = j \cdot \varepsilon^2 = 0,86$  (16), звідки рівень глибини теплонасищення  $\varepsilon = 0,927/\sqrt{j}$ .

Третя, пов'язана з  $E_c$  (12), закономірність полягає в зниженні глибини теплонасищення  $\varepsilon$  при інтенсифікації режимів різання (через  $P_e$ ) (табл. 2).

Із порівняльних даних табл. 2 слідує, що при  $P_e \geq 16$  зовнішня сторона (верхня межа  $\varepsilon = 1$ ) стружки за час контакту з лезом (період теплонасищення) не встигає прогрітися. Прогрів зовнішньої поверхні настає потім внаслідок миттєвого вирівнювання температури по товщині стружки за рахунок теплопровідності оброблюваного матеріалу і це може із-за високої контактної температури при малих  $a_c$  та великих  $V_c$  призводити навіть до її візуального свічення.

Таблиця 2 – Залежність функції теплонасищення  $E_c$  (12) від критерія  $P_e$  і рівня глибини  $\varepsilon$ .

Рівень $\varepsilon$	Значення $E_c$ при відповідних величинах $P_e$			
	8	16	48	192
1,0	0,19			
0,93		0		
0,54			0	
0,5	0,39	0,30	0,07	
0,27				0
0,2	0,59	0,52	0,39	0,20
0,1	0,69	0,64	0,55	0,39
0,0	0,8	0,8	0,8	0,8

Таким чином завдяки розробкам по  $E$  (8) і  $E_c$  (12) були закладені основи дослідження ТПС для конкретних умов процесу різання.

#### Висновки

1. Створена математична модель розрахунку температурного поля по довжині контакта з лезом і товщині стружки та виведена відповідна формула для варіанта трикутного розподілу густини джерела теплоти.

2. Отримана формула середньо-інтегрального значення функції розподілу температури по довжині контакта на зазначеному рівні товщини стружки.

3. Визначені розрахункові вирази для контактної температури тертя стосовно моделей пластини і напівобмеженого тіла та умови їх застосування для стружки по теплофізичному критерію Пекле. Для швидкорухомих джерел теплоти встановлена закономірність зменшення глибини прогріву стружки з ростом критерію Пекле.

**Список використаних джерел:** 1. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с. 2. Резников А.Н. Температурное поле в стружке, возникающее под действием сил трения на передней грани резца. – Журнал технической физики, 1958. – Т.28. – Вып. 1 – С.207-217. 3. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 200с. 4. Карслоу Г.С. Теория теплопроводности. – М. – Л.: ГИТТЛ, 1947. – 288с. 5. Рыкалин Н.Н. Тепловые основы сварки. – М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 271 с. 6. Бобрик П.И. Анализ теплового поля зоны резания при обработке жаропрочных сталей и сплавов /П.И. Бобрик// Тепловые явления и обрабатываемость резанием авиационных материалов: Труды МАТИ. – №64. – М.: Машиностроение, 1966. – С. 9 – 48. 7. Егер Д.К. Движущиеся источники тепла и температура трения. – Сб. переводов иностр. литер. /Прикладная механика и машиностроение. – М.: Изд-во ИЛ, 1952. – №6. – С. 22 – 39. 8. Девят Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1978. – 224 с. 9. Брычков Ю.А., Маричев О.И., Прудников А.П. Таблицы неопределенных интегралов: Справочник. – М.: Наука, 1986. – 192 с. 10. Кравченко Ю.Г., Савченко Ю.В. Визначення коефіцієнтів форми швидкорухомих джерел теплоти при різанні. – Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. 36. наук . праць. – Краматорськ: ДДМА, вип. 26, 2010. – С.409 – 417.

*Надійшла до редколегії 14.03.2013*